

УДК 621.923:[621.922:621.921.34]

**Ю.Д. ФИЛАТОВ**, д-р техн. наук, **В.И. СИДОРКО**, д-р техн. наук,  
**А.Ю. ФИЛАТОВ**, канд. техн. наук, **С.В. КОВАЛЕВ**, канд. техн. наук,  
**А.Г. ВЕТРОВ**, **Я.Л. СИЛЬЧЕНКО**,  
**М.А. ДАНИЛЬЧЕНКО**, Киев, Украина

## **ПОЛИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

В результаті дослідження закономірностей полірування плоских поверхонь оптико-електронних елементів з монокристалічних карбіду кремнію та сапфіру показано, що в якості критеріїв ефективності полірування доцільно використовувати енергію переносу, максимальні значення якої відповідають мінімальній шорсткості, та коефіцієнти шорсткості, що визначають мінімально припустимі значення висотних параметрів.

В результате исследования закономерностей полирования плоских поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллического карбида кремния и сапфира показано, что в качестве критериев эффективности полирования целесообразно использовать энергию переноса, максимальные значения которой соответствуют минимальной шероховатости, и коэффициенты шероховатости, определяющие минимально допустимые значения высотных параметров.

As a result of studies of regularities polishing flat surfaces of optoelectronic components of single crystal silicon carbide and sapphire shown that as polishing performance criteria appropriate to use the energy transfer, the maximum values of which correspond to the minimum roughness and roughness coefficients that determine the minimum permissible altitude parameters.

### **Введение**

Элементы и подложки из монокристаллических материалов, в том числе из карбида кремния и сапфира, широко применяющиеся в оптикоэлектронной технике, в современном производстве изготавливают при помощи методов алмазно-абразивной обработки. Особую сложность

---

© Ю.Д. Филатов, В.И. Сидорко, А.Ю. Филатов, С.В. Ковалев, А.Г. Ветров,  
Я.Л. Сильченко, М.А. Данильченко, 2015

представляет операция полирования, которую осуществляют в один или несколько переходов в зависимости от требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности. Полированные поверхности должны удовлетворять требованиям по точности формы (3–5 интерференционных колец) и по качеству обработки ( $S-d$ ) от 60–40 до 20–10 (U.S Military Surface Quality Specification, MIL-PRF-13830B). Поверхности подложек, подготовленные под нанесение эпитаксиального слоя (epi-ready) должны удовлетворять требованиям, регламентирующим точность ориентации плоскости кристалла ( $\pm 0,2-0,5^\circ$ ), плотность дислокаций  $((1-4) \cdot 10^3 \text{ см}^{-2})$ , плотность микропапов (менее  $30 \text{ см}^{-2}$ ), структурное совершенство (FWHM – полуширина линии качания – 30–50 угл. сек), а также «оптическим» требованиям по неплоскостности (менее 10 мкм на диаметре 3 дюйма) и шероховатости ( $Ra = 0,3-1,0 \text{ нм}$ ). Шероховатость обработанной поверхности является наиболее важным показателем процесса полирования прецизионных поверхностей элементов оптоэлектроники из неметаллических материалов [1–5] и характеризует качество обработанных поверхностей, устанавливает их зависимость от размеров частиц шлама и их концентрации в зоне контакта [6–7]. Улучшение качества обработки оптико-электронных элементов из монокристаллических материалов может быть достигнуто только при использовании новых полировальных суспензий и коллоидных систем из наночастиц, оптимизация характеристик которых является актуальной.

Целью исследования является изучение влияния свойств обрабатываемого материала и полировальной суспензии или коллоидной системы на шероховатость обработанных поверхностей.

### Методика исследований

Плоские поверхности элементов из карбида кремния (плоскость C) и сапфира (плоскость A) полировали на шлифовально-полировальном станке при частоте вращения полировальника 90 об/мин, давлении прижима детали к притиру 0,003–0,005 МПа, смещении штриха 30 мм, длине штриха 50 мм и средней температуре в зоне контакта 300 К. Монокристаллический карбид кремния (политип 6H-SiC, плотность  $3,21 \text{ г/см}^3$ , коэффициент теплопроводности 490 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 6,5, постоянные решетки  $a = 0,3073 \text{ нм}$  и

$c = 1,511$  нм [8]) характеризовался частотами собственных колебаний молекулярных фрагментов SiC:  $15,0 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $794 \text{ см}^{-1}$ ) и  $18,9 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $1000 \text{ см}^{-1}$ ) [9, 10]. Монокристаллы сапфира (плотность  $3,98 \text{ г/см}^3$ , коэффициент теплопроводности  $30,3 \text{ Вт/(м·К)}$ , статическая диэлектрическая проницаемость –  $9,3$  для плоскости  $A$ , постоянные решетки  $a = 0,4758$  нм,  $c = 1,2991$  нм) характеризовались частотами собственных колебаний молекулярных фрагментов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $10,8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $573 \text{ см}^{-1}$ ),  $12,1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $642 \text{ см}^{-1}$ ) и  $14,1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $748 \text{ см}^{-1}$ ).

Закономерности полирования монокристаллов карбида кремния и сапфира исследовали при использовании специально приготовленных суспензий из алмазных микропорошков (1), порошков кубического нитрида бора cBN (2) и порошков МАХ-фазы  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  (3) [8, 10], а также коллоидных систем из наночастиц полировальных порошков (4, 5). Частоты собственных колебаний ( $\text{см}^{-1}$ ) молекулярных фрагментов полировальных порошков алмаза –  $1135$  и  $1332$ , кубического нитрида бора –  $1056$ ,  $1100$ ,  $1304$  и порошков МАХ-фазы  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  –  $260$ ,  $420$ ,  $605$ ,  $1320$  и  $1590$  [10]. Статическая диэлектрическая проницаемость полировальных порошков алмаза –  $5,7$ , cBN –  $2,5$  и  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  –  $3,5$  [20].

### **Закономерности формирования шероховатой поверхности элементов из монокристаллического карбида кремния и сапфира.**

На основе результатов исследования механизма формирования шероховатости обрабатываемой поверхности [11, 12] разработан метод компьютерного моделирования микропрофиля, который позволяет рассчитать высоту микро- и нанонеровностей. Высота нанонеровностей полированной поверхности пропорциональна поверхностной плотности частиц шлама (квадрату модуля функции состояния кластера  $|\psi|^2$ ,  $\text{м}^{-1}$ ) в соответствии с формулой  $z(x) = k|\psi|^2$  [11, 12], а коэффициент пропорциональности определяется как  $(d_i/2)^2$  ( $d_i$  – размер частиц шлама). Для расчета высоты неровностей профиля полированной поверхности, когда линии выступов и впадин практически совпадают со средней линией профилограммы, коэффициент пропорциональности в формуле для расчета нанопрофиля  $z(x)$  определяется как  $d_i^2$ . Функция, определяющая

высоту нанонеровностей поверхности в процессе полирования, вдоль базовой линии выражается через функции параболического цилиндра.

Для расчета нанопрофиля полированной поверхности необходимо и достаточно определить размеры частиц шлама  $d(k_i) = [S_0(k_i + 1)/\pi]^{1/2}$  и функцию их распределения по размерам. Метод компьютерного моделирования нанопрофиля поверхностей элементов из монокристаллических материалов при полировании основан на методе Монте-Карло и позволяет рассчитать высоту неровностей профиля поверхности  $Z(x)$ . По модельным профилограммам полированной поверхности, определялись высотные параметры шероховатости: среднее

арифметическое отклонение профиля  $Ra = \frac{1}{L} \int_0^L Z(x) dx$ , среднее

квадратичное отклонение профиля  $Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [z(x)]^2 dx}$  и наибольшая

высота профиля  $Rmax$ .

В результате компьютерного моделирования при усреднении высотных параметров шероховатости по пяти модельным профилограммам получены значения  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$ , величины отношения  $\chi = Rmax/Ra$ , а также коэффициенты относительной шероховатости  $k_a = Ra/a_v$ ,  $k_q = Rq/a_v$  и  $k_m = Rmax/a_v$ , нормированные на наиболее вероятный размер частицы шлама (табл. 1, 2).

Таблица 1 – Параметры шероховатости полированной поверхности карбида кремния

Параметры шероховатости полированной поверхности	Полировальный состав			
	1	2	3	4
$Ra$ , нм	5,4±0,1	5,6±0,2	5,1±0,2	4,6±0,1
$Rq$ , нм	5,8±0,2	5,9±0,2	5,4±0,2	4,7±0,1
$Rmax$ , нм	9,3±0,9	8,2±1,1	7,4±0,5	6,5±0,2
$\chi$	1,7	1,5	1,5	1,4
$k_a$	2,3	2,1	2,1	1,7
$k_q$	2,4	2,2	2,2	1,8
$k_m$	3,9	3,0	3,1	2,5

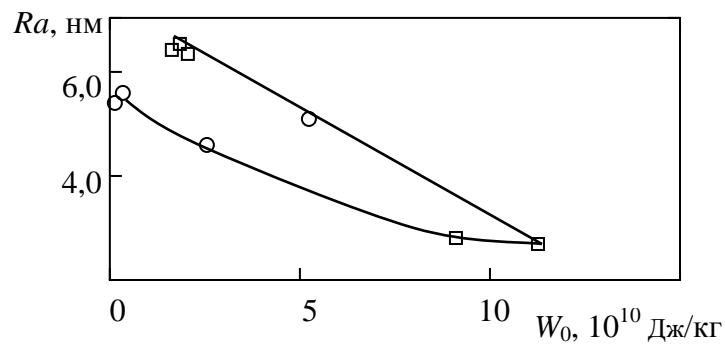
Таблица 2 – Параметры шероховатости полированной поверхности сапфира

Параметры шероховатости поверхности	Полировальный состав				
	1	2	3	4	5
$Ra$ , нм	6,3±0,3	6,5±0,2	6,4±0,2	2,8±0,2	2,7±0,1
$Rq$ , нм	6,7±0,2	7,0±0,2	6,8±0,3	3,0±0,2	2,9±0,1
$Rmax$ , нм	12,3±0,2	12,8±1,4	12,9±1,0	4,7±0,3	4,7±0,2
$\chi$	1,9	2,0	2,0	1,6	1,7
$k_a$	2,5	2,3	2,3	1,4	1,4
$k_q$	2,7	2,4	2,5	1,5	1,4
$k_m$	4,9	4,4	4,7	2,3	2,3

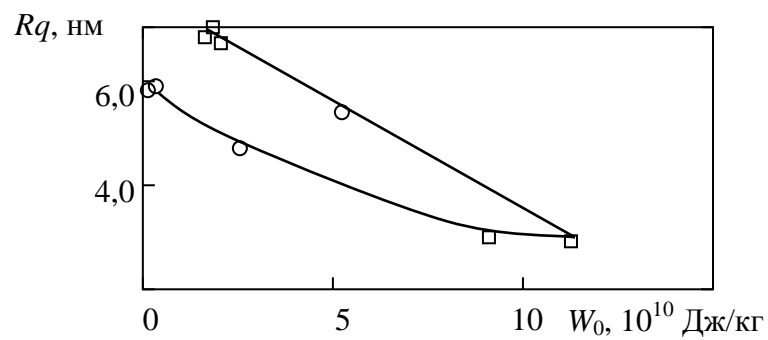
В результате анализа приведенных данных показано, что высотные параметры шероховатости  $Ra$ ,  $Rq$  и  $Rmax$  уменьшаются при увеличении энергии переноса (рис. 1).

Чем больше энергии затрачивается на образование и удаление с обрабатываемой поверхности частиц шлама, тем меньше их размеры и соответственно высота нанопрофиля полированной поверхности. Именно поэтому величина энергии переноса может быть использована в качестве критерия эффективности полирования монокристаллических карбида кремния и сапфира. На рис. 2 приведены значения коэффициентов шероховатости  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m$  и  $\chi$ , характеризующих процессы формирования нанопрофиля обработанных поверхностей элементов из карбида кремния (а) и сапфира (б) при полировании полировальными суспензиями (1)–(3) и коллоидными системами (4)–(5).

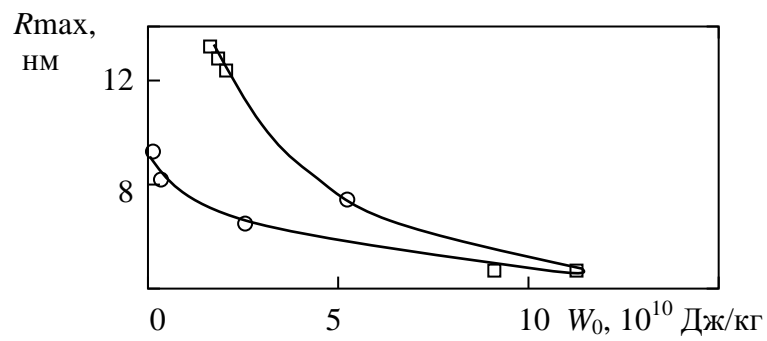
В отличие от процессов шлифования неметаллических материалов при условии  $d_i > Rmax$ , когда коэффициенты шероховатости  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m < 1$  и  $\chi > 1$  [11], для полирования монокристаллического карбида кремния и сапфира при условии  $d_i \leq Rmax$  эти коэффициенты  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m$ ,  $\chi > 1$  и уменьшаются при улучшении качества обработки. Для сравнения эффективности применения различных полировальных составов достаточно найти минимальные значения указанных коэффициентов.



a



б



в

Рисунок 1 – Зависимость параметров шероховатости полированных поверхностей  $Ra$  (a),  $Rq$  (б) и  $R_{max}$  (в) от энергии переноса ( $\square$  – карбид кремния,  $\circ$  – сапфир)

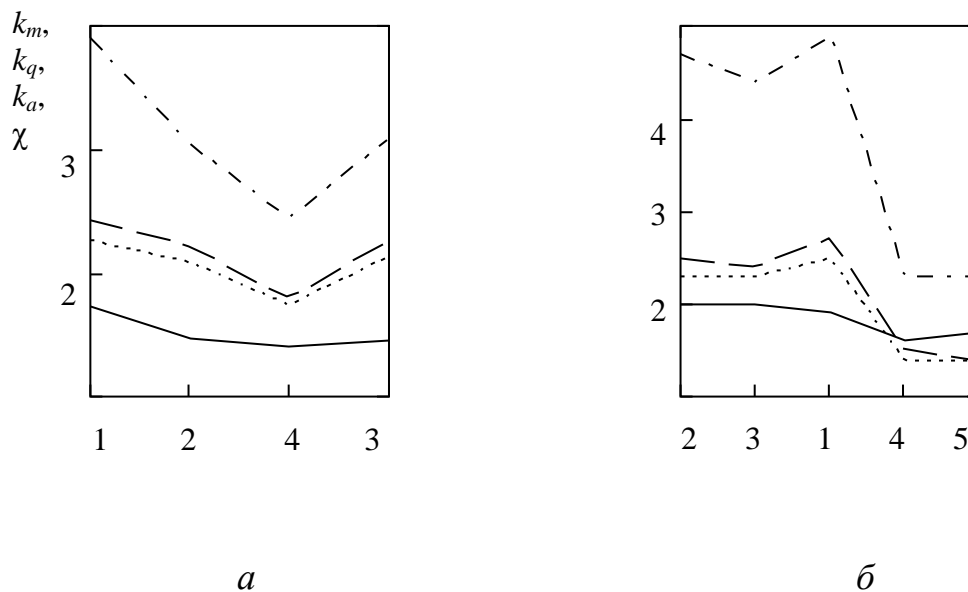


Рисунок 2 – Коэффициенты  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m$  и  $\chi$ , характеризующие шероховатость поверхностей элементов из карбида кремния (а) и сапфира (б) при полировании полировальными суспензиями (1)–(3) и коллоидными системами (4)–(5)

Минимальными значениями коэффициентов шероховатости  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m$ ,  $\chi$  (рис. 2) характеризуется шероховатость поверхностей элементов из монокристаллического карбида кремния, обработанных при помощи коллоидной системы (4), и сапфира, полирование которых осуществлялось при помощи коллоидных систем (4)–(5). Сравнивая значения этих коэффициентов для процессов шлифования и полирования, можно заключить, что коэффициенты шероховатости  $k_m$ ,  $k_q$  и  $k_a$  уменьшаются на 1–2 порядка величины, что позволяет говорить о принципиальных отличиях в механизмах формирования микро- и нанорельефа обрабатываемой поверхности. Сравнивая значения приведенных коэффициентов шероховатости для процессов обработки карбида кремния и сапфира при помощи различных полировальных составов, можно утверждать, что полирование целесообразно осуществлять при помощи суспензий полировальных порошков, а нанополирование с помощью коллоидных систем из наночастиц.

## Выводы

В результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей полирования плоских поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллического карбида кремния и сапфира показано, что в качестве критерия эффективности полирования следует использовать энергию переноса, поскольку ее максимальные значения соответствуют минимальным параметрам шероховатости. В результате компьютерного моделирования нанопрофиля обработанных поверхностей элементов оптоэлектроники из карбида кремния и сапфира построены расчетные профилограммы, по которым определены значения высотных параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Rq$  и  $R_{\max}$  и коэффициентов шероховатости  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m$ ,  $\chi$ , по минимальным значениям которых можно количественно оценить эффективность полирования при помощи различных полировальных составов.

**Список использованных источников:** 1. Шероховатость поверхностей при финишной алмазно-абразивной обработке / Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Филатов А.Ю. и др. // Сверхтв. материалы. – 2009. – № 3. – С. 68–74. 2. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Filatov O.Yu. et al. Surface Quality Control in Diamond Abrasive Finishing // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI., Proc. of SPIE. – 2009. – 7389. – P. 73892–73892-O. 3. Филатов Ю.Д., Яцук В.П., Филатов А.Ю. и др. Оценка шероховатости и отражательной способности поверхностей изделий из неметаллических материалов при финишной алмазно-абразивной обработке // Сверхтвердые матер. – 2009. – № 5. – С. 70–81. 4. Filatov Yu.D., Filatov O.Yu., Heisel U. et al. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. SPIE. – 2010. – 7718. – P. 77181J. 5. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Optical Eng. – 2011. – 50, art. 063401–063401–7. 6. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49. 7. Филатов Ю. Д. Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. – 2008. – № 1. – С. 59–66. 8. Properties of Silicon Carbide edited by Gary Lynn Harris / Published by: INSPEC, Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1995. – 289 p. 9. Филатов Ю.Д., Ветров А.Г., Сидорко В.И. и др. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния // Сверхтвердые материалы. – 2013. – № 5. – С. 63–71. 10. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического



карбида кремнія / Ю.Д. Філатов, А.Г. Ветров, В.И. Сидорко и др. // Сверхтв. материалы. – 2015. – № 1. – С. 63–71. 11. Filatov Yu.D., Mechanism of formation of surface microrelief in machining glass // J. Superhard Mater. – 1991. – 13(5). – P. 63–67. 12. Філатов Ю.Д., Рогов В.В., Громов К.С. Шероховатость поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 4. – С. 42–46.

**Bibliography (transliterated):** Workshop on Modeling of Machining Operations. 51–58. 8. Denkena B, de Leon Garcia L, Köhler J (2007) FEM-Simulation of High-1. Sherohovatosť poverhnostej pri finishnoj almazno-abrazivnoj obrabotke / Filatov Ju.D., Sidorko V.I., Filatov A.Ju. i dr. // Sverhtv. materialy. – 2009. – № 3. – S. 68–74. 2. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Filatov O.Yu. et al. Surface Quality Control in Diamond Abrasive Finishing // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI., Proc. of SPIE. – 2009. – 7389. – P. 73892–73892-O. 3. Filatov Ju.D., Jashhuk V.P., Filatov A.Ju. i dr. Ocenka sherohovatosti i otrazhatel'noj sposobnosti poverhnostej izdelij iz nemetallicheskih materialov pri finishnoj almazno-abrazivnoj obrabotke // Sverhtverdye mater. – 2009. – № 5. – S. 70–81. 4. Filatov Yu.D., Filatov O.Yu., Heisel U. et al. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. SPIE. – 2010. – 7718. – P. 77181J. 5. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Optical Eng. – 2011. – 50, art. 063401–063401–7. 6. Filatov Ju.D. Polirovanie aljumosilikatnyh materialov instrumentom so svjazannym poliroval'nym poroshkom // Sverhtv. materialy. – 2001. – № 3. – S. 36–49. 7. Filatov Ju. D. Polirovanie precizionnyh poverhnostej detalej iz nemetallicheskih materialov instrumentom so svjazannym poliroval'nym poroshkom // Sverhtv. materialy. – 2008. – № 1. – S. 59–66. 8. Properties of Silicon Carbide edited by Gary Lynn Harris / Published by: INSPEC, Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1995. – 289 p. 9. Filatov Ju.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I. i dr. Zakonomernosti finishnoj almazno-abrazivnoj obrabotki monokristallicheskogo karbida kremnija // Sverhtverdye materialy. – 2013. – № 5. – S. 63–71. 10. Polirovanie jelementov optiko-jelektronnoj tehniki iz monokristallicheskogo karbida kremnija / Ju.D. Filatov, A.G. Vetrov, V.I. Sidorko i dr. // Sverhtv. materialy. – 2015. – № 1. – S. 63–71. 11. Filatov Yu.D., Mechanism of formation of surface microrelief in machining glass // J. Superhard Mater. – 1991. – 13(5). – P. 63–67. 12. Filatov Ju.D., Rogov V.V., Gromov K.S. Sherohovatosť poverhnosti pri obrabotke stekla // Sverhtverdye materialy. – 1993. – № 4. – S. 42–46.